

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



L G M D

Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

---

Conception, optimisation et réalisation d'une prothèse fémorale

---

**Auteurs : KIBBOUA Akram Farouk & HETRAF Rayane**

Sous la direction de **M. BELOUADAH Zouheyr** ENP

Présenté et soutenu publiquement le (18/07/2024)

**Composition du jury :**

Président :	M. BELKACEMI Yacine	MCA	ENP
Encadrant :	M. BELOUADAH Zouheyr	MCA	ENP
Examineur :	M. SEDJAL Hamid	MAA	ENP
Représentant de l'incubateur :	M. BOUSBAI M'hamed	MCB	ENP

ENP 2024



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



L G M D

Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

---

Conception, optimisation et réalisation d'une prothèse fémorale

---

**Auteurs : KIBBOUA Akram Farouk & HETRAF Rayane**

Sous la direction de **M. BELOUADAH Zouheyr** ENP

Présenté et soutenu publiquement le (18/07/2024)

**Composition du jury :**

Président :	M. BELKACEMI Yacine	MCA	ENP
Encadrant :	M. BELOUADAH Zouheyr	MCA	ENP
Examineur :	M. SEDJAL Hamid	MAA	ENP
Représentant de l'incubateur :	M. BOUSBAL M'hamed	MCB	ENP

ENP 2024

## ملخص

تمثل عمليات البتر تحديًا كبيرًا وتخلق صعوبات للمرضى من حيث الحركة، مما يجعل من الصعب عليهم أداء وظائفهم بشكل يومي. ولذلك يجب على العلم أن يستجيب لنداء المساهمة في حل هذه المشكلة من خلال تقديم بدائل مناسبة ومريحة وخفيفة ومقاومة لمستخدميه تمنحهم أرضية تحاكي الحالة الطبيعية. لذا، ركزنا في هذا العمل على تصميم طرف صناعي مخصص لعمليات بتر الفخذ؛ مكون من جزأين، التجويف ومفصل الركبة. في الجهاز الأول هدفنا هو تقليل وزنه مع الحفاظ على القوة اللازمة مما سيخفف العبء على المرضى ويقلل تكاليف المواد على الشركات المصنعة.

أما بالنسبة للجهاز الثاني، فقد سعينا إلى اقتراح تصميمين للركبة مع نظامين مختلفين للتخميد، أحدهما ميكانيكي والآخر هوائي. وسيقدم هذا التحالف طبقتين مناسبتين لجميع فئات المجتمع. يضمن كلا التصميمين المقاومة ومحاكاة الحالة الطبيعية.

---

كلمات مفتاحية: الركبة الاصطناعية، المقبس، المسح ثلاثي الأبعاد، التصميم، التحسين، النماذج الأولية.

---

## Abstract

Amputations represent a great challenge and create difficulties for patients in terms of mobility, making it difficult for them to function on a daily basis. Science must therefore respond to the call to contribute to solving this problem by offering its users suitable, comfortable, light and resistant alternatives that give them a floor that imitates the natural state. So, in this work, we focused on designing a prosthesis specifically for femoral amputations ; composed of two parts, the socket and the knee joint. In the first device, our goal is to reduce its weight while maintaining the necessary strength, which will reduce the burden on patients and reduce material costs for manufacturers.

As for the second device, we endeavored to propose two designs for the knee with two different damping systems, one mechanical and the other pneumatic. This alliance will offer two layers suitable for all classes of society. Both designs ensure resistance and simulation of normal condition.

---

**Keywords :** Knee prosthesis, Socket, 3D Scan, Design, Optimization, Prototyping.

---

# Résumé

Les amputations représentent un grand défi et créent des difficultés pour les patients en termes de mobilité, ce qui rend difficile leur fonctionnement au quotidien. La science doit donc répondre à l'appel de contribuer à résoudre ce problème en proposant à ses utilisateurs des alternatives appropriées, confortables, légères et résistantes qui leur donnent un sol qui imite l'état naturel. Ainsi, dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur la conception d'une prothèse spécialement pour les amputations fémorales ; composé de deux parties, l'emboîture et l'articulation de genou. Dans le premier dispositif, notre objectif est de réduire son poids tout en conservant la résistance nécessaire, ce qui réduira la charge pesant sur les patients et réduira les coûts matériels pour les fabricants.

Quant au deuxième dispositif, nous nous sommes attachés à proposer deux conceptions pour le genou avec deux systèmes de contrôle de la phase pendulaire différents, l'un mécanique et l'autre pneumatique. Cette alliance offrira deux couches adaptées à toutes les classes des besoin des amputée. Les deux conceptions assurent la résistance et la simulation de la condition normale.

---

**Mots clés :** Prothèse de genou, Emboîture, Scan 3D, Conception, Optimisation, Prototypage.

---

# Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à mes parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de mon parcours. Je ne les remercierai jamais assez pour tous les sacrifices et les efforts qu'ils ont fait pour me permettre de réussir. Je ne serai arrivé à rien sans eux et je tiens à leur exprimer ma plus profonde gratitude et mon amour à travers ce modeste travail.

Tout d'abord je remercie infiniment mon binome Rayane qui était toujours sérieux et ambitieux durant la réalisation de ce travail où on a eu des difficultés mais on a réussi de l'y sortir ensemble. C'était un très grand plaisir de lui connaître ses derniers cinq ans et de l'avoir comme binome et de travailler ensemble, que Dieu te bénisse et te prête le bonheur.

Je tiens également à remercier mes camarades de la promotion, nous étions toujours solidaires entre nous durant ces trois années et nous avons passé des moments parfois heureux parfois durs , je les remercie pour pouvoir vivre cette aventure avec eux.

Je cite spécialement mes amis que j'ai connus durant mon cursus et qui ont devenus mes chères amis et qu'ils ont m'aider soit moralement soit techniquement dans les moments difficiles, je cite Jugurtha, Abdelbaki, Nacereddine, Sarah, Lylia, Lyes, Abdelhak, Yasser et plein d'autres.

Merci pour cette belle aventure.

- *KIBBOUA Akram Farouk* -

# Dédicace

C'est avec gratitude et sincérité que je dédie cette réussite :

## **À mes très chers parents**

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point vous remercier comme il se doit. Votre affection me couvre, votre bienveillance me guide, et votre présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles. Qu'Allah vous prête bonheur et longue vie.

## **À mon frère et ma sœur**

## **Et un remerciement particulier à mon cher binôme Akram**

Pour avoir donné tous ses efforts afin de construire ce modeste travail, pour sa patience, sa compréhension, son soutien, sa complicité et son encouragement.

## **Pour mes chers amis du groupe chat "Le Garage"**

Pour m'avoir aidé quand j'en avais besoin. À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre projet.

- *HETRAF Rayane* -

# Remerciements

Louange à Allah, le tout miséricordieux le très miséricordieux et le tout puissant d'avoir guidé nos pas vers les portes du savoir tout en illuminant notre chemin, et de nous avoir accordé la patience, la force, la volonté et le courage nécessaires à l'achèvement de notre travail dans de bonnes conditions.

Nous ne saurions clôturer cette phase sans adresser nos vifs remerciements à notre encadrant, M. Zouheyr BELOUADAH, pour ses conseils éclairés et son suivi inconditionnel tout au long de ce travail. Votre disponibilité et investissement nous ont été très précieux. Nos remerciements vont également aux membres du jury, en particulier le président Dr. Yacine BELKACEMI, ainsi que les membres du jury M. Hamid SEDJAL et M. Mhamed BOUSBAI qui ont accepté de noter notre travail et de le commenter en donnant des suggestions très utiles. Votre connaissance et vos commentaires ont été une grande motivation pour nous aider à améliorer ce travail et à donner de notre mieux. Nous vous sommes très reconnaissants de passer du temps à commenter notre travail et à y réfléchir.

Nous remercions tout spécialement l'ONAAPH d'avoir permis de voir et de toucher l'appareillage, et spécialement de nous avoir prêté des prothèses de genoux. Votre soutien matériel a été d'une grande aide pour accomplir ce travail. En outre, nous aimerions remercier tous nos enseignants pour leur connaissance et l'enseignement qu'ils nous ont donné dans la progression de notre étude. Votre enseignement nous a aidés à apprendre ce que nous avons pu pratiquer pour réaliser ce travail.

Un grand merci aussi au responsable du FabLab M. Abdelkarim LAHLAH pour toute son aide et assistance et surtout sa disponibilité constante lors de notre présence et travail au Fab Lab et à l'incubateur, toujours dans la bonne humeur et un accueil chaleureux pour aider.

Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude à l'entreprise AlcadWorks et à ses équipes pour avoir mis à notre disposition leur imprimante 3D et partagé leur expertise. Votre support technique et vos conseils ont été essentiels pour la réussite de notre projet.

Nous vous remercions sincèrement nos enseignants de l'enseignement et pour toute l'énergie positive que vous mettez dans la réussite de vos élèves. Nous n'oublierons pas de reconnaître nos collègues et amis qui nous ont encouragés, poussés et soutenus de toutes les manières possibles tout au long de ce projet de fin d'études. Vos leçons, conseils et amitié ont vraiment rendu cela bien plus gratifiant et mémorable.

Enfin, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements sincères à tous ceux qui ont contribué de quelque manière que ce soit à la réalisation de notre projet de fin d'études.



# Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

<b>Introduction générale</b>	<b>16</b>
<b>1 Généralités sur l'appareillage pour la réadaptation des personnes amputés</b>	<b>17</b>
1.1 Introduction . . . . .	17
1.2 Causes d'amputations du membre inférieur . . . . .	17
1.3 Classification des amputations du membre inférieur . . . . .	18
1.4 Processus de réhabilitation et d'appareillage . . . . .	19
1.5 Appareillage des personnes amputées trans-fémorales . . . . .	20
1.6 Emboîture . . . . .	23
1.7 Biomécanique de la marche humaine . . . . .	24
1.8 Prothèse de Genoux . . . . .	25
1.8.1 Technologies Hydrauliques et Pneumatiques . . . . .	25
1.8.2 Technologies des Genoux Mécaniques . . . . .	26
1.9 Genoux Régulés par Microprocesseur . . . . .	27
1.10 Systèmes à Frein Mécanique et Hydraulique . . . . .	28
1.11 Systèmes Polycentriques . . . . .	28
1.12 Progrès et Innovations . . . . .	28
1.13 État de l'art . . . . .	29
1.13.1 Optimisation de l'emboîture . . . . .	29
1.13.2 Méthodes de fabrication des emboîtures . . . . .	34

1.13.3	Fabrication des emboîtures par méthode de "Stratification" . . . . .	37
1.14	Conclusion . . . . .	39
<b>2</b>	<b>Emboîture fémorale</b>	<b>40</b>
2.1	Introduction . . . . .	40
2.2	Procédé d'établissement du modèle . . . . .	41
2.3	Simulation et optimisation de l'emboîture . . . . .	44
2.3.1	Modèle optimisé . . . . .	44
2.3.2	Caractérisation du matériau à utilisé . . . . .	45
2.3.3	Calcul du Tenseur de Rigidité pour les matériaux PLA et PLA + CF . . . . .	45
2.3.4	Simulation numérique de l'emboîture . . . . .	47
2.3.5	Résultats . . . . .	48
2.3.6	Comparaison des Résultats de Simulation . . . . .	54
2.4	Prototypage des emboîtures : . . . . .	55
2.5	Fabrication de l'emboîture . . . . .	57
2.6	Conclusion . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Prothèse de Genou</b>	<b>60</b>
3.1	Introduction . . . . .	60
3.2	Conception du Genou . . . . .	60
3.2.1	Phase d'appui . . . . .	62
3.2.2	Phase d'oscillation . . . . .	63
3.3	Cinématique d'une prothèse de genou Polycentrique . . . . .	64
3.3.1	Analyse Géométrique et Modélisation Cinématique . . . . .	65
3.3.2	Condition de Grashof . . . . .	66
3.4	Spécifications et Conception du Design . . . . .	67
3.4.1	Critères de Conception . . . . .	67
3.5	Mécanique du Mouvement du Genou . . . . .	68
3.5.1	Contraintes Géométriques . . . . .	70
3.6	Résultats . . . . .	71
3.6.1	Description du Problème . . . . .	71
3.6.2	Paramètres d'entrée . . . . .	71

3.6.3	Paramètres de Sortie . . . . .	71
3.6.4	Visualisation . . . . .	73
3.7	Discussion des résultats . . . . .	74
3.7.1	Simulation en Statique des Genoux . . . . .	77
3.8	Conception de genou CAO . . . . .	84
3.8.1	Modèle 1 : Genou Mécanique . . . . .	85
3.8.2	Modèle 2 : Genou Pneumatique . . . . .	91
3.9	Prototypage du genou . . . . .	96
3.9.1	Modèle 1 : Genou Mécanique . . . . .	97
3.9.2	Modèle 2 : Genou Pneumatique . . . . .	98
3.10	Comparaison avec autres modèles . . . . .	99
3.11	Conclusion . . . . .	100
	<b>Conclusion générale</b>	<b>102</b>
	<b>Perspectives</b>	<b>103</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>105</b>
	<b>Annexes</b>	<b>111</b>

**Confidentiel**